

**RATARAKENTEEEN INSTRUMENTOINTI-  
JA MALLINNUSSUUNNITELMA,  
250 kN:n JA 300 kN:n AKSELIPAINOT**

- o **Iikka Järvenpää**
- o **Pauli Kolisoja**
- o **Matti Levomäki**

**RATARAKENTEN INSTRUMENTOINTI-  
JA MALLINNUSSUUNNITELMA,  
250 kN:n JA 300 kN:n AKSELIPAINOT**

- o Ilkka Järvenpää**
- o Pauli Kolisoja**
- o Matti Levomäki**

**RHK**  
RATAHALLINTOKESKUS  
KAIVOKATU 6, PL 185  
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111  
FAX. (09) 5840 5100  
SÄHKÖPOSTI: [info@rhk.fi](mailto:info@rhk.fi)

ISBN 952-445-020-8  
ISSN 1455-2604

Järvenpää, Iikka – Kolisoja, Pauli – Levomäki, Matti. Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 1999. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4 /1999. 32 sivua. ISBN 952-445-020-8, ISSN 1455-2604.

**Avainsanat:** ratarakenne, instrumentointi, akselipainot, mallinnus

## TIIVISTELMÄ

Tämä ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998. Suunnitelma on tehty yhteistyönä Teknillisen korkeakoulun lujuusopin laboratoriossa, tielaboratoriossa ja Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratoriossa.

Suunnitelma koskee Kouvolan ja Korian välisen rataosuuden pohjoiselle raiteelle kilometrilukeman 187+580 kohdalle yhteen poikkileikkaukseen tehtävää ratarakenteen instrumentointia. Instrumentoitavan poikkileikkauksen kohdalla rata on suora ja lämpöeristämätön.

Instrumentointi sisältää yhteen ratapölkkyyn, kumpaankin kiskoon viereisellä pölkkyvälillä sekä näiden alapuolella olevaan ratapenkereeseen tehtävät anturiasennukset. Instrumentoinnin lisäksi suunnitelmaan sisältyy kohteesta tehtävien mittausten ja mittaustulosten analysoinnin suunnittelu.

Raiteen osalta mitattavina suureina ovat pölkyn pystysiirtymä, kiskojen liike pölkkyyn nähden, kiskoihin kohdistuvat vaaka- ja pystyvoimat sekä pölkyn ja kiskojen taivutusmuodonmuutos. Ratapenkereen osalta mitattavina suureina ovat vastaavasti maanpaine sekä penkereen pysty- ja vaakasuuntainen muodonmuutos kolmella eri syvyystasolla raiteen alapuolella. Sekä penkereestä että kahdesta muusta mittauspisteestä talletetaan geofonien avulla värinähavaintoja. Ratapenkereestä mitataan sen lämpötilaa ja vesipitoisuutta. Lisäksi kuvataan videolle mitattavat junat ja mitataan tutkalla junien nopeudet.

Suunnitelman mukaisen ratarakenteen instrumentoinnin tavoitteena on saada mittauksiin perustuvaa tietoa erisuuruisten junakuormien ratarakenteelle aiheuttamista rasituksista ja niiden jakautumisesta ratapenkereessä. Mittaustulosten perusteella voidaan tällöin testata raiteen ja ratapenkereen mekaanista toimintaa kuvaavan matemaattisen mallinnuksen toimivuutta ja oikeellisuutta. Toimivaa rakennemallinnusta voidaan puolestaan käyttää työkaluna arvioitaessa mahdollisuuksia 250 kN ja 300 kN akselipainojen käyttöönottoon.



Järvenpää, Iikka – Kolisoja, Pauli – Levomäki, Matti. **Plan for Instrumentation and modeling a Railway Track, 250 kN and 300 kN axle loads.** Finnish Rail Administration, Technical Unit. Helsinki 1999. Publications of Finnish Rail Administration A 4/1999. 32 pages. ISBN 952-445-020-8, ISSN 1455-2604.

**Key words:** railway track, instrumentation, axle loads, modeling

## SUMMARY

This plan for instrumentation and modeling a railway track is part of Finnish Rail Administration's (RHK) investigation with the aim of taking 250 kN and 300 kN axle loads into use. This study is done in cooperation with the Laboratories of Mechanics of Materials and Highway Engineering at the Helsinki University of Technology and the Geotechnical Laboratory at the Tampere University of Technology

This plan deals with instrumentation of a railway track section between Kouvola and Koria at Southeast Finland. The more detailed place for the instrumentation site is on the northern rail at the 187+580 km from Helsinki. The track on the instrumentation site is straight and has no frost insulation boards.

The instrumentation includes installation of transducers on one sleeper, on both rails in the adjacent sleeper spacing and into the underlying railway embankment. In addition, planning of both the in-situ measurements and the analysis of measurement results is included in the instrumentation plan.

As far as the sleeper and the rails are concerned the quantities to be measured include vertical displacement of the sleeper, displacement between the rails and the sleeper, vertical and horizontal forces acting on the rails as well as deformations of the sleeper and the rails due to bending moments. Correspondingly, the quantities to be measured in the embankment include earth pressure as well as vertical and horizontal deformations at altogether three different levels below the rails. Vibrations are recorded using geophones both from the embankment and from two other measurement points outside of the embankment. In addition, temperature measurement are made at three and water content measurements at two levels inside of the embankment, the passing by trains are recorded on a video tape and their velocities are measured using a radar.

The aim of the instrumentation presented in this plan is to get measured information on the magnitudes and distributions of stresses and strains induced by the trainloads on a railway structure. The measurement results thus enable testing of the usefulness and reliability of the mathematical models that are used to describe the mechanical behavior of railway tracks and embankments. If the models prove out to be reliable, they can be used as tools in estimating possibilities for increasing the allowable axle loads up to 250 kN and 300 kN.

## ESIPUHE

Ratahallintokeskus aloitti vuonna 1998 tutkimusprojektin, jonka tarkoituksena on ollut tuottaa tietoa 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoa varten. Tämä ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma on osa tutkimusprojektia.

Suunnitelma on tehty yhteistyönä Teknillisen korkeakoulun lujuusopin laboratoriossa ja tielaboratoriossa sekä Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratoriossa.

Tutkimuksen tekijät ovat Iikka Järvenpää, Pauli Kolisoja ja Matti Levomäki. Työtä ovat ohjanneet ylitarkastajat Pasi Leimi ja Kari Ojanperä Ratahallintokeskuksen Teknisestä yksiköstä.

Helsingissä, marraskuussa 1999

Ratahallintokeskus  
Tekninen yksikkö

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SUMMARY .....	4
ESIPUHE.....	5
SISÄLLYSLUETTELO.....	6
1. YLEISTÄ .....	8
1.1 Instrumentointikohde.....	8
1.2 Instrumentoinnin tavoite.....	8
2. MITATTAVAT SUUREET JA NIIDEN VALINTAPERUSTEET .....	9
2.1 Raiteesta tehtävät mittaukset .....	9
2.1.1 Pölkystä mitattavat suureet .....	9
2.2 Ratapenkereestä tehtävät mittaukset.....	9
2.2.1 Maanpaine.....	9
2.2.2 Venymä.....	10
3. INSTRUMENTOINNIN TOTEUTUSTAPA.....	11
3.1 Raiteen instrumentointi.....	11
3.1.1 Kiskoon tehtävät venymäliuska-asennukset.....	11
3.1.2 Kiskon siirtymäanturiasennukset.....	11
3.1.3 Pölkyn anturiasennukset .....	12
3.1.4 Kaapelointi.....	12
3.1.5 Signaalinkäsittely ja rekisteröinti .....	12
3.2 Ratapenkereen instrumentointi .....	13
3.2.1 Maanpainemittaukset.....	13
3.2.2 Venymämittaukset.....	14
3.2.3 Ratapenkereen fysikaalinen tila.....	17
3.2.4 Kaapelointi.....	17
3.2.5 Mittaustulosten rekisteröinti .....	17
3.3 Tärinämittaukset .....	17
3.4 Muut mittaukset.....	18
4. MITTAUSINSTRUMENTOINNIN ASENNUS .....	19
4.1 Asennusten vaiheistus.....	19
4.2 Vaihe 1: ratapenkereen alaosan instrumentointi.....	19
4.2.1 Kaivutyöt .....	19
4.2.2 Täyttömateriaalit.....	20
4.2.3 Täytön tiivistäminen .....	20
4.3 Vaihe 2: ratapenkereen yläosan instrumentointi.....	20
4.4 Vaihe 3: raiteen instrumentointi .....	22
4.4.1 Ajoitus ja työvaiheet .....	22
4.4.2 Venymäliuska-asennukset .....	22
4.4.3 Muut anturiasennukset.....	22
4.4.4 Muut asennustyöt.....	23
4.5 Eri osapuolten tehtävät ja vastuut .....	23
5. MITTAUKSET .....	25
5.1 Mittausten ajankohta ja kesto .....	25
5.2 Eri osapuolten tehtävät ja vastuut.....	25
5.3 Turvajärjestelyt.....	25
6. KUSTANNUKSET .....	26



6.1	TKK Lujuusopin laboratorio .....	26
6.1.1	Instrumentoinnin kustannukset .....	26
6.1.2	Mittauksen kustannukset .....	26
6.2	TTKK/Geotekniikan laboratorio .....	27
6.2.1	Instrumentoinnin kustannukset .....	27
6.2.2	Mittauksen kustannukset .....	27
7.	INSTRUMENTOINTIKOHTTEEN MALLINNUS .....	28
7.1	Yleistä .....	28
7.2	Raiteen mallinnus .....	28
7.3	Ratapenkereen mallinnus .....	28
7.3.1	Ratapenkereen mallinnukseen liittyvät osatehtävät .....	28
7.3.2	Mittaustulosten esikäsittely .....	29
7.3.3	Täydentävät laboratoriokokeet .....	29
7.3.4	Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva mallinnus .....	29
7.3.5	Mallinnus elementtimenetelmällä .....	30
7.3.6	Ratapenkereen mallinnuksen aikataulu ja kustannukset .....	30

# 1. YLEISTÄ

## 1.1 Instrumentointikohde

Instrumentointikohde sijaitsee Kouvolan ja Korian välisellä suoralla rataosuudella suunnilleen kilometrilukeman 187 + 580 kohdalla. Kohteen tarkka sijainti selviää, kun tiedot instrumentointikohdan lähialueelle sijoittuvien kiskohitsausten ja mahdollisten kulunvalvontalaitteiden tulevista sijaintikohdista on käytettävissä. Instrumentointi tehdään radan pohjoisenpuoleiseen raiteeseen, jolla raskaiden junien osuus liikenteestä on suurempi. Toinen keskeinen syy mittausten tekemiseen pohjoisenpuoleisesta raiteesta on se, että Kouvolan aseman suunnasta tuleva liikenne kulkee ennen instrumentointikohteeseen tuloa pitkähkön matkan suoraa rataosuutta pitkin, jolloin kiskoon kohdistuvat sivuttaisvoimat ovat oletettavasti pienemmät kuin mitä ne olisivat välittömästi kaarteesta tulon jälkeen.

## 1.2 Instrumentoinnin tavoite

Ratarakenteiden kuormittuminen riippuu useasta eri parametristä. Akselipainojen kasvattaminen lisää rasituksia kaikissa radan rakenneosissa. Päälysrakenteen osalta olisi selvítettävä ainakin ratapölkyn, kiskonkiinnittimien ja itse kiskon rasitusten riippuvuus akselipainosta. Teorian pohjalta laaditut laskentakaavat tarvitsevat tuekseen mittaustuloksia. Merkittävintä roolia näyttelevät alusrakenteen ominaisuudet, koska suurimmaksi osaksi niiden perusteella määräytyy radan jousto. Riittävä datamäärä saataneen talteen muutaman vuorokauden kestävän mittausrupeaman aikana. Mittauksia suunniteltaessa on mitattavien suureiden määrä pyrittävä saamaan mahdollisimman pieneksi. Kuitenkin on huolehdittava siitä, että kaikki tarvittava tieto saadaan kokoon joko suoraan tai välillisesti esim. eri suureiden mittaustuloksia yhdistelemällä. Viimeksi mainittu menettely lisää analysoinnin vaatimaa työmäärää. Suunnittelussa onkin mittaus- ja rekisteröintilaitteiston ohella pidettävä mielessä mittaustulosten analysointiin käytettävissä olevat resurssit.

Radan tukikerroksen alapuolisten rakennekerrosten instrumentoinnin tavoitteena on saada mittauksiin perustuvaa tietoa junakuormien ratarakenteelle aiheuttamista rasituksista ja niiden jakautumisesta tukikerroksen alapuolisessa rakenteen osassa. Mittaustulosten perusteella voidaan tällöin tarkistaa ratapenkereen mekaanista toimintaa kuvaavan matemaattisen mallinnuksen toimivuutta ja oikeellisuutta. Toimivan rakennemallinnuksen avulla taas voidaan tarkastella muun muassa erilaisten akselipainojen vaikutusta ratarakenteeseen ja pohjamaahan kohdistuviin rasituksiin, arvioida kuormitusten jakautumista ratapenkereessä sekä vertailla esimerkiksi erilaisten ratarakennevaihtoehtojen tai ratarakenteen parantamisvaihtoehtojen teknistä toimintaa.

## 2. MITATTAVAT SUUREET JA NIIDEN VALINTAPERUSTEET

### 2.1 Raiteesta tehtävät mittaukset

**Kiskoon vaikuttava pysty- ja vaakavoima** ovat primäärisiä suureita, jotka mitataan kummastakin kiskosta yhdelle pölkkyvälille tehdyillä venymäliuska-asennuksilla. Tarkasteltaessa ratarakenteen dynaamista käyttäytymistä toimivat nämä voimat herätteenä.

**Kiskon alapinnan venymä** mitataan kummastakin kiskosta pölkkyvälin keskeltä. Venymätiedon avulla päästään arvioimaan kiskon jännitysheilahduksia erisuuruisten pyöräkuormien alaisena. Mikäli mittausten aikana ei tehdä venymäsignaalien nollatasokorjauksia, voidaan tasojen siirtymistä päätellä, kuinka suuria lämpövenymävaihteluita on esiintynyt. Mikäli tämä katsotaan aiheelliseksi, voidaan tähän liittyen seurata kiskojen lämpötiloja erillisillä mittauksilla.

**Kiskon siirtymät pölkkyyn nähden** on hyödyllistä tuntea arvioitaessa kiskojen kiinnityksiin kohdistuvia rasituksia. Mittaukset tehdään kummastakin kiskosta pölkyn kohdalta. Siirtymämittausten tuloksena saadaan selville kiskon liike pölkyn suhteen pysty- ja vaakasuunnassa sekä kiskon kallistuma. Geometrisen tarkastelun avulla on mahdollista arvioida mm. välilevyn puristumaa ja kiinnityselinten joustoa.

#### 2.1.1 Pölkystä mitattavat suureet

**Pölkyn venymät** karakterisoivat sen rasituksia kuormituksen alaisena. Vallitseva rasitus on peräisin taivutuksesta, joka syntyy kiskojen välittämän pystykuorman ja sepelin tukipaineen yhteisvaikutuksesta. Vaakasuoran kuormituksen (Y-voima) vaikutus on vähäisempi. Se synnyttää pölkyn keskiosalle sekä veto- että taivutusrasitusta. Aksiaali-voimasta peräisin oleva muodonmuutos jää ainakin teoriassa hyvin pieneksi. Mikäli pölkyn keskiosalle syntyy vain vähän taivutettavaa rasitusta, on se merkinä hyvästä tuennasta. Pölkyn rasituksia erisuuruisten kuormitusten alaisena päästään vertailemaan mittaamalla venymää pölkyn keskeltä ja kiskojen kohdalta.

**Pölkyn pystysiirtymä** mitataan ratapenkereen alla olevan perusmaan suhteen, ja sen käyttäytyminen kuormituksen alaisena kertoo alusrakenteen ominaisuuksista. Useammasta kohdasta pölkyn pituusakselia mitatuista siirtymistä saadaan lisäksi approksimaatio pölkyn taipumaviivalle.

### 2.2 Ratapenkereestä tehtävät mittaukset

#### 2.2.1 Maanpaine

Tavallisin suure, jolla maamateriaalissa vaikuttavia rasituksia kuvataan, on maassa tai maarakenteessa tietyllä ajanhetkellä tiettyyn suuntaan vaikuttava jännitys. Erityisesti maan ja rakenteiden välisissä vuorovaikutustilanteissa maan ja rakenteen välistä jännitystä nimitetään usein myös maanpaineeksi.



### 2.2.2 Venymä

Maanpaineen ohella toinen maarakenteista suhteellisen yleisesti mitattu rakenteen mekaaniseen käyttäytymiseen liittyvä suure on venymä (engl. "strain"). Tarkasteltavien materiaalien diskreetistä luonteesta johtuen venymällä tarkoitetaan tällöin kahden pisteen välistä suhteellista muodonmuutosta, joka saadaan laskettua tietystä jännitystila-muutoksesta aiheutuvan pisteiden välisen etäisyyden muutoksen ja pisteiden alkuperäisen etäisyyden osamääränä.

Maarakenteen mekaanisen mallinnuksen verifiointitarkoituksessa venymämittaukset ovat periaatteessa yhtä käyttökelpoisia kuin suorat maanpaineiden mittauksetkin. Maan-painemittauksiin nähden venymämittauksilla on lisäksi se etu, että niiden yhteydessä itse mittausinstrumentin häiritsevä vaikutus mitattavan suureen jakautumaan ei yleensä ole yhtä kriittinen kuin maanpainemittauksen tapauksessa on tilanne.

### 3. INSTRUMENTOINNIN TOTEUTUSTAPA

#### 3.1 Raiteen instrumentointi

##### 3.1.1 Kiskoon tehtävät venymäliuska-asennukset

**Pystyvoima** mitataan kummastakin kiskosta asentamalla pölkkövälin kahteen leikkaukseen venymäliuskat molemmiin puolin uumaa. Liuskat sijoitetaan mahdollisimman lähelle kiskon poikkileikkauksen neutraalitasoa siten, että niiden mittaussuunta muodostaa 45 asteen kulman kiskon pituusakseliin nähden. Tällöin ne mittaavat uuman leikkausmuodonmuutosta. Kiskon neljä liuskaa kytketään kokosillaksi, jonka ulostulo kalibroidaan verrannolliseksi pystyvoimaan sen vaikuttaessa pölkkövälin keskellä. Vahvistinkanavia tarvitaan 2 kpl ja rekisteröintikanavia 2 kpl.

**Vaakavoima** mitataan pölkköväliltä vastaavalla tavalla. Kiskoa kohti tarvitaan yhteensä 12 venymäliuskaa (käytännössä 6 kpl nk. T-liuskaa), jotka asennetaan jalan ylä- ja alapinnalle. Liuskoista muodostetaan kolme mittasiltaa, joiden ulostulot sopivasti summaamalla eliminoidaan pystyvoiman ja väännön synnyttämien venymien vaikutus. Jäljelle jäävä signaali on verrannollinen vaakavoimaan. Kalibrointitilanteessa voimasuureet vaikuttavat pölkkövälin keskellä. Vahvistinkanavia 6 kpl ja rekisteröintikanavia 2 kpl.

**Kiskon alapinnan venymä** pölkkövälin keskellä vaatii tavanomaisen venymäliuska-asennuksen. Venymämittauksiin käytettävät vahvistimet vaativat normaalisti vähintään puolisolityhtäknän eli kaksi venymäliuskaa. Liuskat liimataan jalan alapinnan keski- viivalle toinen kiskon pituus- ja toinen poikittaisuuntaiseksi. Vahvistinkanavia 2 kpl ja rekisteröintikanavia 2 kpl.

##### 3.1.2 Kiskon siirtymäanturiasennukset

**Vaakasiirtymä** pölkköyyn nähden mitataan kummankin kiskon jalasta ja hamarasta käyttäen jousipalautteisilla karoilla varustettuja induktiivisia antureita. Anturien rungot asennetaan pölkköyyn liimattuihin kiinnikkeisiin siten, että mittaussuunta (=karan liikesuunta) on vaakatasossa, kiskon akselia vastaan kohtisuorassa. Karan kärjen vastinpintana toimii kiskoon liimattu eristelevypalanen, joka tarvitaan galvaaniseen erotukseen. Sekä vahvistin- että rekisteröintikanavatarve on 4 kpl.

**Pystysiirtymän** mittaus pölkköyyn nähden hoidetaan vastaavalla konseptilla käyttäen joko jousipalautteisia induktiivisia tai sitten potentiometriantureita. Edelliset eivät mahdu olemaan jalan yläpuolella, mikä edellyttää pienen kuopan kaivamista sepeliin pölkyyn viereen. Vahvistinkanavia tarvitaan 4 kpl ja rekisteröintikanavia 4 kpl.

### 3.1.3 Pölkyn anturiasennukset

**Pölkyn venymä** mitataan yläpinnasta pölkyn keskeltä ja kiskojen kohdalta sivupinnasta läheltä pölkyn yläreunaa. Tarkempi sijainti riippuu pölkyn pään geometriasta. Mittaavina antureina käytetään normaalia pidempiä venymäliuskoja. Pölkyn pinta liimauskohdassa tasoitetaan tarpeen mukaan joko täyttävällä liimalla tai epoksitasoitteella ja hiomalla. Vahvistinkanavia 3 kpl ja rekisteröintikanavia 3 kpl.

**Pölkyn pystysiirtymä** perusmaan suhteen mitataan induktiivisilla antureilla pölkyn päistä ja keskeltä. Anturien kiinnittämistä varten upotetaan ratapenkkaan perusmaan sisään asti ulottuvat painokairan terät tai vastaavat pyöröteräket. Niitä tarvitaan anturia kohti kaksi kappaletta. Ensimmäiset kaksi sijoitetaan pölkyn keskikohdan molemmin puolin noin 5 cm etäisyydelle pölkyn reunasta. Muut sijoitetaan pareittain pölkyn päiden ulkopuolelle keskiviivan jatkeelle siten, että ensimmäinen tulee noin 5 cm:n päähän ja ulompi noin 40 cm päähän pölkyn päädyistä (kuva 1). Teräket katkaistaan noin 5 cm pölkyn yläpinnan yläpuolelta. Terästen päihin hitsataan anturien kiinnikepalkit. Vahvistinkanavia 3 kpl ja rekisteröintikanavia 3 kpl.

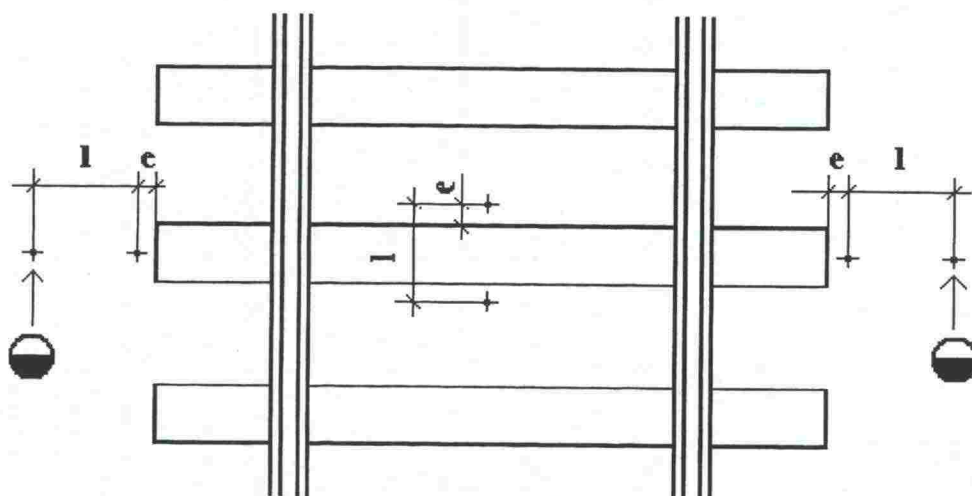
### 3.1.4 Kaapelointi

Anturikaapelointiin käytetään muovipäälysteistä punosrakenteisella suojasukalla varustettua  $4 \times 0,5 \text{ mm}^2$  kaapelia. Koska mittalaitteita varten paikalle tuotava koppi saadaan sijoitettua radan viereen instrumentoinnin kohdalle, tarvittava kaapelien pituus tulee olemaan keskimäärin 15-20 metriä.

### 3.1.5 Signaalinkäsittely ja rekisteröinti

Yhteensä tarvitaan em. suureiden mittauksiin 24 vahvistin- ja 20 rekisteröintikanavaa. Rekisteröinti tapahtuu PC-pohjaisilla tiedonkeruulaitteilla ja varmistus nauhureilla.





Kuva 1. Anturien kiinnittämiseen tarvittavat kuusi pystyterästä sijoitetaan kuvan mukaisesti siten, että mitta  $l$  on 400...500 mm ja etäisyys  $e$  pölkyn reunasta on 50...100 mm. Pystyterästen alapää ulottuvat ratapenkereen alla olevaan perusmaahan vähintään 1,0 m ja yläpää noin 50 mm pölkyn yläpinnan tason yläpuolelle. Kauempana pölkkyjen päistä sijaitsevien kiinnitysterästen kohdilta asennuksen yhteydessä tehdään painokairaukset tiiviin pohjakerroksen pintaan asti.

## 3.2 Ratapenkereen instrumentointi

### 3.2.1 Maanpainemittaukset

Tämän tutkimuksen yhteydessä tehtävät maanpainemittaukset ovat luonteeltaan lähinnä muita mittauksia täydentäviä ja varmentavia. Niinpä maanpaineen mittausta tehdäänkin vain neljästä pisteestä penkereeseen asennettavia maanpainesellejä käyttäen. Käytettävät maanpainesellit tilataan Nottinghamin yliopiston tielaboratoriosta, jossa kyseistä anturityyppiä on käytetty menestyksellisesti jo useiden vuosien ajan.

Maanpainesellit sijoitetaan rinnakkaisen raiteen puoleisen kiskon alapuolelle kahteen peräkkäiseen poikkileikkaukseen kahdelle syvyystasolle siten, että ylemmät anturit sijaitsevat lähes välittömästi tukikerroksen alapuolella ja alemmat suunnilleen erityskerroksen puolivälin tasolla (kuva 3).

Maanpainemittauksissa tarvittavien vahvistin- ja rekisteröintikanavien lukumäärä on 4 kappaletta.

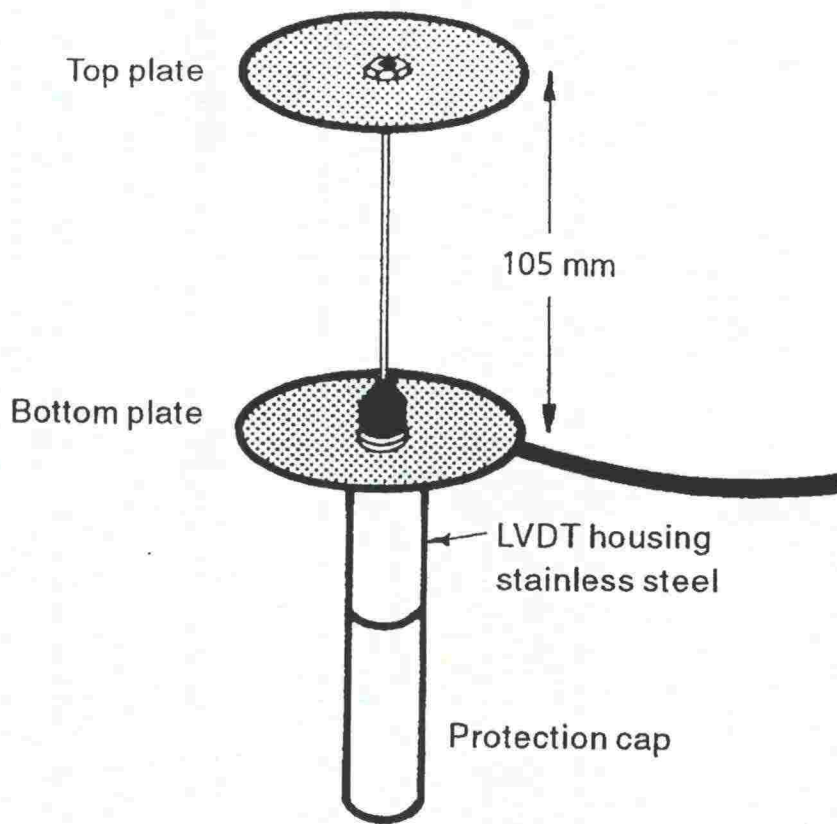
### 3.2.2 Venymämittaukset

Koska mittaustarkkuudeltaan riittäviä kaupallisesti tai puolikaupallisesti valmistettavia venymäantureita ei tutkimuksen edellyttämällä aikataululla ole saatavissa, tehdään venymämittaukset TTKK:n geotekniikan laboratoriossa itse rakennettavia mittaussinstrumentteja käyttäen. Instrumenttityyppinä käytetään periaatteeltaan kuvan 2 mukaista kahden levymäisen kappaleen välisen etäisyyden muutosta mittaavaa anturia, jossa siirtymämittaukseen käytetään induktiivista etäisyysanturia (engl. 'proximity transducer').

Pystysuuntaista venymää mitataan kahdesta peräkkäisestä poikkileikkauksesta kummankin kiskon alapuolelta kolmelta instrumenttien asennustasolta siten, että ylin mittaustaso on välittömästi tukikerroksen alapuolella, keskimäinen suunnilleen eristyskerroksen puolivälin tasolla ja alin lähellä pohjamaan pintaa. Jotta lähempänä rinnakkaista raidetta sijaitsevien alimman mittaustason anturien asentamisen yhteydessä vältetään työläitä rinnakkaisen raiteen tukemistoimenpiteitä, jätetään nämä anturit kuitenkin pois (kuva 3).

Vaakasuuntaista venymää mitataan yhdeltä instrumenttien asennustasolta kummankin kiskon alapuolelta. Tämän mittauksen tavoitteena on ennen muuta selvittää onko rinnakkaisen raiteen puolella vaikuttavalla paremmalla sivuttaistuella merkittävä vaikutus ratapenkereen vaakasuuntaisiin muodonmuutoksiin. Sopiva mittaussantureiden asennustaso lienee suunnilleen keskimäisten pystysuuntaisten venymämittausten tasolla. Tarkoituksenmukaisin asennustaso määritetään ennen anturien asentamista tehtävien alustavien rakennemallinnusten tulosten perusteella.

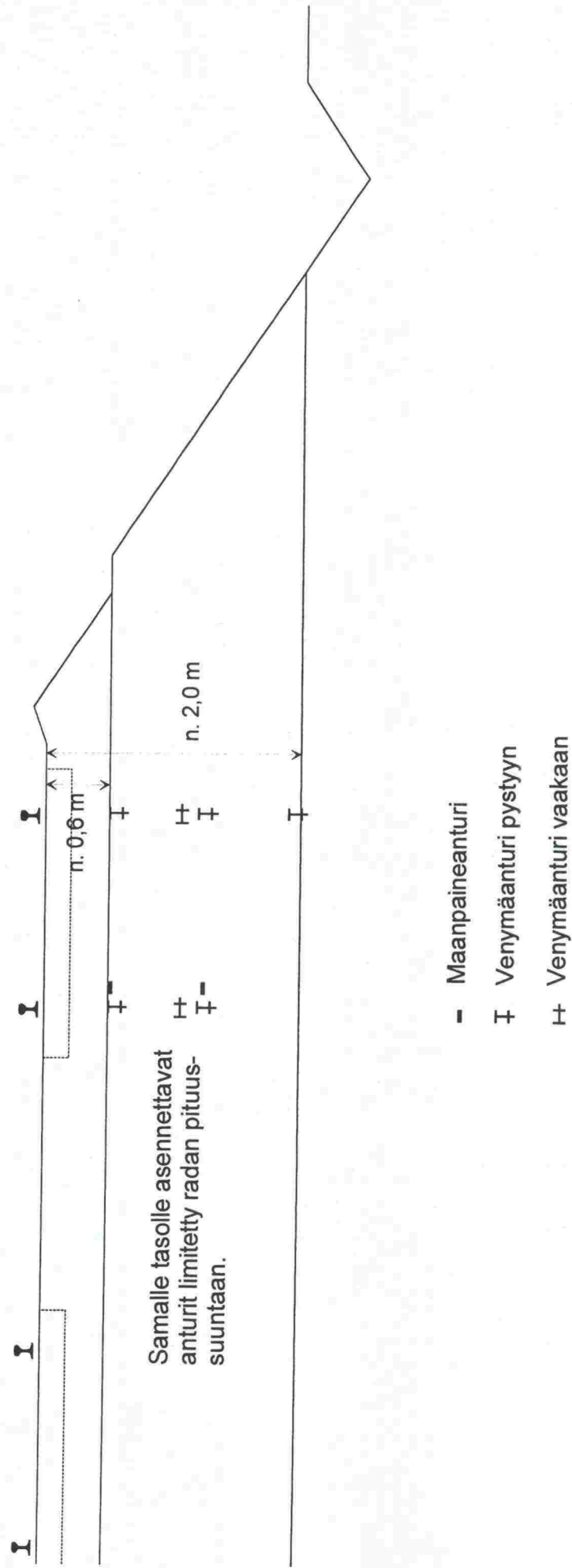
Venymämittauksissa tarvittavien rekisteröintikanavien lukumäärä on teoreettisesti 14 kpl sillä edellytyksellä, että yksikään mittaussanturi ei vaurioidu instrumenttien asennuksen ja päälle rakennettavan pengertäytön tekemisen yhteydessä.

**Kuva 2**

**Venymämittauksissa käytettävän mittausanturin periaate.**

Kuvasta poiketen varsinainen siirtymämittaus on kuitenkin tarkoitus tehdä LVDT-anturin sijasta induktiivisella etäisyysanturilla.





Kuva 3 Ratapenkereeseen asennettavien venymä- ja maanpainamittausantureiden sijoittelun periaate

### 3.2.3 Ratapenkereen fysikaalinen tila

Jotta ratapenkereen fysikaalisessa tilassa tapahtuvien muutosten mahdollisia vaikutuksia ratapenkereen mekaaniseen käyttäytymiseen voitaisiin arvioida, asennetaan penkereeseen kolme lämpötilan ja kaksi kosteuden mittaustanturia. Lämpötila-anturit asennetaan kaikille kolmelle venymäanturin asennustasolle ja kosteusanturit kahdelle ylimmälle venymäanturin asennustasolle.

### 3.2.4 Kaapelointi

Kaapelointi tehdään mittaussignaalien häiriöttömän siirron kannalta riittävän laadukkaalla kaapelilla, joka kestää myös pengermateriaalista kaapeliin kohdistuvat mekaaniset rasitukset.

### 3.2.5 Mittaustulosten rekisteröinti

Mittaustulosten rekisteröintiin käytetään PC-pohjaista tiedonkeruulaitteistoa, jossa mittaussignaalit muutetaan digitaaliseen muotoon 32-kanavaisen 16-bitin A/D-muunninkortin avulla. Mittaustapahtuman yhteydessä tulokset tallentuvat ensi vaiheessa mittaustietokoneen keskusmuistiin, josta ne junan mentyä ohi siirretään kiintolevylle ja varmuuskopioidaan edelleen ZIP-levyasemalle. Tarvittaessa osa mittaustuloksista voitaneen taltioda myös TKK/Lujuusopin paikalle tuomaa DAT-nauhurilaitteistoa käyttäen.

## 3.3 Tärinämittaukset

Mittaukset maasta tai rakennuksesta toteutetaan kolmella pystysuuntaisella geofonilla. Mittarien vuokraus ja asennus hoidetaan ostopalveluna Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulun yrityspalvelusta. Paikanpäällä on lisäksi purettava tulokset mittarista tietokoneelle. Tulosten raportoinnista huolehtii sama taho kuin mittarien asennuksista. Raportointi tarkoittaa taajuuksien esittämistä aika-akselilla. Raportointi ei siis sisällä tulosten analysointia.

Tulosten analysointi tehdään TKK/TIE:n toimesta kevyesti (80h). Lisäksi TKK/TIE hoitaa mittarien purun tietokoneelle paikanpäällä, mikä yhteensä vie 32h.

Mittalaitteiden asennus, vuokra ja tulosten raportointi maksavat korkeintaan 8 000mk. Kevyt analysointi aiheuttaa kustannuksia 16 000mk ja mittauspaikalla oleminen majoitus- ja päivärahakuluineen 7 400mk.

Lisäksi TKK:n hallintovirasto laskuttaa loppusummasta 10%, joten **tärinämittausten kustannukset ovat yhteensä noin 35 000 mk.**

### 3.4 Muut mittaukset

Mittauskohdan ohittavien junien nopeudet mitataan tutkalla, jonka lukemat rekisteröidään videokuvausta käyttäen. Tutkan ja videokameran sopivalla sijoittelulla voidaan samalla dokumentoida mitattavien junien vaunu- ja akselistotyypit. Videokamera tallettaa myös ääntä lovipyörähavaintojen varmistamiseksi.

Rhk järjestää mittavaunun kulkemaan koekohteessa kahdesti ja lisäksi TKK/TIE tekee raiteenmittauksia 20 m matkalla. Mitattavia suureita ovat:

- raideleveys
- raideleveys myös jousipidikkeiden sisäpuolelta mitattuna
- raideleveys myös kiskon jalasta mitattuna
- vaakasuora kaltevuus

## 4. MITTAUSINSTRUMENTOINNIN ASENNUS

### 4.1 Asennusten vaiheistus

Kohdan 3 mukaisen mittausinstrumenttien asentaminen tapahtuu periaatteessa seuraavan vaiheistuksen mukaisesti:

1. Kahden alimman instrumentointitason mittausinstrumentit asennetaan ennen tukikerroksen seulontaa ja ratapölkkyjen vaihtoa. Kaivutöiden laajuudesta ja mittausinstrumenttien asennuksen vaatimasta käsityöstä johtuen työvaihe kestää useita tunteja. Koska asennuksen edellyttämät kaivutyö todennäköisesti aiheuttaa rajoituksia myös viereisen raiteen liikennöitävyydelle, tulee asennus ajoittaa viikonvaihteeseen ja yöaikaan, jolloin riittävän pitkä liikennekatko viereiselle raiteelle on helpoimmin järjestettävissä. Näillä näkymin asennus toteutetaan heti roudan sulettua toukokuun 1999 alkupuoliskolla. Tarkempi ajankohta on kuitenkin sovitettava perusparannustyön aikatauluun yhteistyössä Oy VR-Rata Ab:n kanssa.
2. Ylimmän instrumentointitason mittausinstrumentit asennetaan erillisenä työvaiheena tukikerroksen seulonnan yhteydessä. Asennusajankohta on tällöin sovitettava perusparannustyömaan aikatauluun siten, että seulontakone voidaan pysäyttää asennustyön ajaksi (noin kaksi tuntia) tarkasti instrumenttien asennuskohdalle. Tällöin instrumentit voidaan asentaa suoraan tukikerroksen alapinnan alapuolelle, eikä erillisiä tukikerrokseen kohdistuvia kaivutoimenpiteitä tarvitse tämän jälkeen suorittaa. Näillä näkymin asennusvaihe ajoittuu kesäkuun 1999 alkuun.
3. Raiteen instrumentointi tehdään kolmantena erillisenä työvaiheena, koska se voidaan toteuttaa vasta sen jälkeen, kun raide on tuettu paikoilleen oikeaan asentoon ja korkeusasemaan. Näillä näkymin asennusvaiheen todennäköinen ajankohta on kesäkuun 1999 loppupuoli.

Edellä mainittujen asennusvaiheiden tällä hetkellä näköpiirissä oleva ajoittuminen suhteessa Riihimäki-Kouvola-rataosan päällysrakenteen uusimistyömaan aikatauluun on esitetty liitteenä olevassa projektiaikataulussa.

### 4.2 Vaihe 1: ratapenkereen alaosan instrumentointi

#### 4.2.1 Kaivutyöt

Asennuskohdan ratapenger kaivetaan auki kuvan 4 mukaisessa laajuudessa. Kaivuun yhteydessä pengertäytön alkuperäistä tiiviyyttä mitataan radiometrisellä tiheysmittauksella ja mahdollisuuksien mukaan myös volymetrimittauksella.



#### **4.2.2 Täyttömateriaalit**

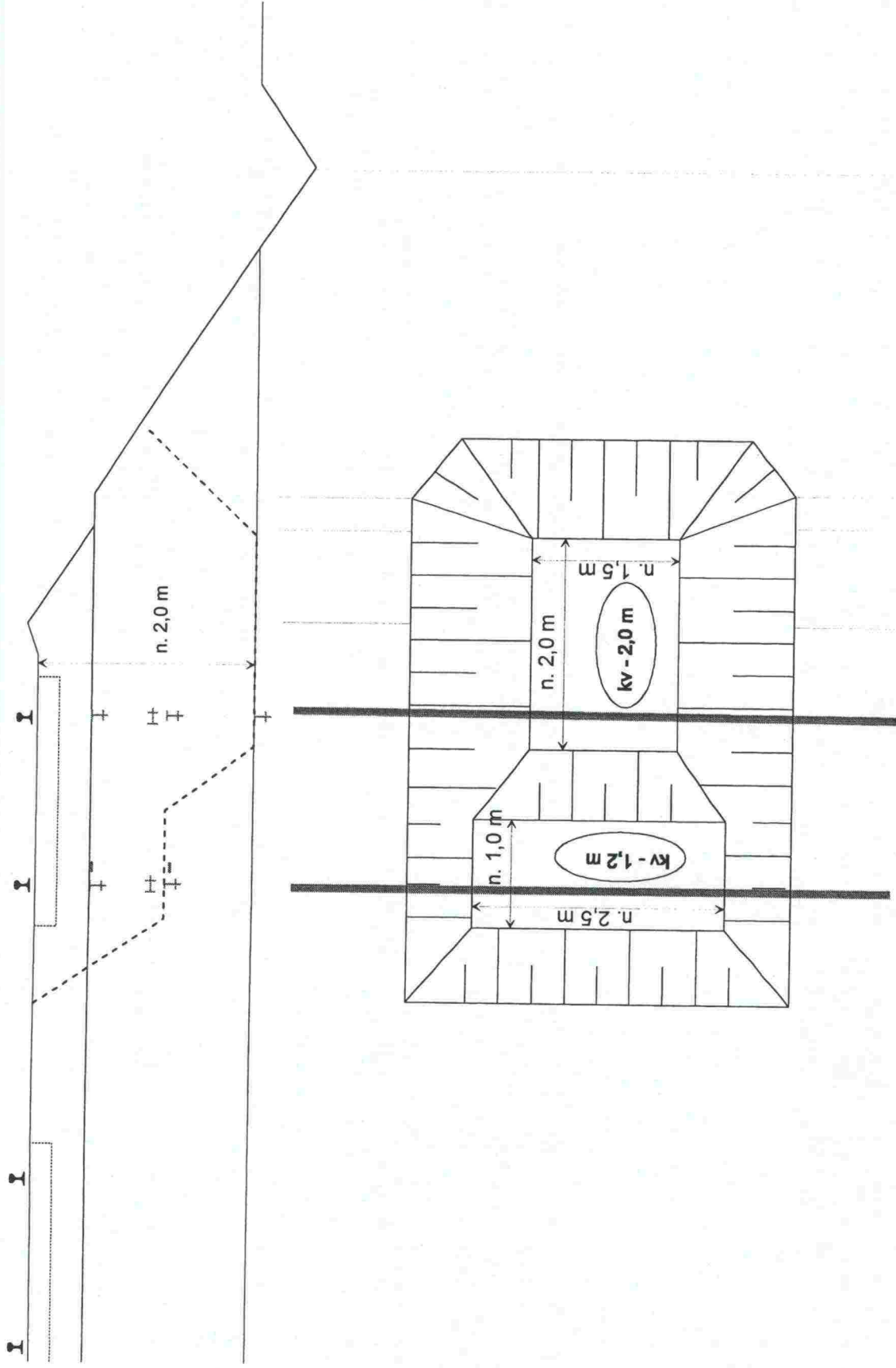
Täyttömateriaalina käytetään ensisijaisesti penkereen alkuperäistä maa-ainesta. Lähempänä kuin 0,5 m asennettavista mittausinstrumenteista ei kuitenkaan sallita raekooltaan yli 60 mm olevia kiviä eikä koko täytössä raekooltaan yli 150 mm olevia kiviä tai lohkareita.

#### **4.2.3 Täytön tiivistäminen**

Täyttö tiivistetään kerroksittain noin 200 mm paksuisina kerroksina penkereen alkuperäistä tiiviyyttä vastaavaan tilaan. Täytön tiiviyyttä tarkkaillaan tiheys- ja pudotuspainomittauksin.

### **4.3 Vaihe 2: ratapenkereen yläosan instrumentointi**

Tukikerroksen seulonta keskeytetään mittausinstrumenttien asennuksen vaatimaksi ajaksi pysäyttämällä seulontakone täsmälleen vaiheessa 1 asennettujen mittausinstrumenttien kohdalle. Instrumenttien asennus tukikerroksen alapinnan alapuolelle tapahtuu tällöin seulontakoneen alta käsin. Asennustilan ahtaudesta ja asennuksen vaatimasta käsityöstä johtuen instrumenttien asentamiseen varattavan ajan on oltava kaksi tuntia.



Kuva 4 Ratapenkereen instrumentoinnin vaihe 1:een liittyvä kaivu



## 4.4 Vaihe 3: raiteen instrumentointi

### 4.4.1 Ajoitus ja työvaiheet

Raiteen instrumentoinnissa käytetään pääosin TKK:n Lujuusopin laboratorion olemassa olevaa laitteistoa. Anturit ovat rakenteeltaan sellaisia, että niitä ei ole syytä jättää pitkiksi ajoiksi valvomattomiin olosuhteisiin. Näin ollen raiteeseen tehtävät asennukset tapahtuvat välittömästi ennen mittauksia ja purku mieluiten heti mittausten jälkeen.

Pölkyn pystysiirtymien mittaamisessa käytettävien anturikiinnikkeiden vaatimat teräkset tulee asentaa ennen muiden raiteeseen tulevien instrumenttiasennusten tekemistä. Tarkoituksenmukaisin ajankohta kiinniketerästen asentamiselle on välittömästi sen jälkeen, kun ratapölkkyt on vaihdettu, raide on nostettu oikeaan korkeustasoon ja tuettu oikeaan asemaansa. Kiinniketeräksinä käytetään halkaisijaltaan vähintään 25 mm olevia terästankoja. Periaatepiirros kiinniketerästen sijoittelusta mitattavan pölyn ympärille on esitetty kuvassa 1. Kuvassa 1 on myös osoitettu pisteet, joiden kohdalta tehdään painokairaukset tiiviin pohjakerroksen yläpintaan asti kiinniketerästen paikoilleen asentamisen yhteydessä.

Raiteen instrumentointiin osallistuu Lujuusopin laboratoriosta kaksi henkilöä, jotka kykenevät viemään työ läpi kahdessa viikossa edellyttäen, että kalibrointivaiheessa saadaan kolmas henkilö avuksi muutamaksi tunniksi.

### 4.4.2 Venymäliuska-asennukset

Venymäliuska-asennuksen työvaiheet ovat asennuskohdan puhdistus/tasointi hiomalla, rasvanpoisto liuottimella, liuskojen liimaus, kytkeminen mittasillaksi, mittasillan kytkeminen kaapelilla vahvistimeen, toiminnan tarkastus, liuskojen ja kytkennän suojaukset sekä mittasillan kalibrointi. Ilman kalibrointivaihetta liuska-asennuksiin kuluu arviolta kaksi tai kolme työpäivää. On kuitenkin huomattava, että esimerkiksi liuskojen liimaus ei käy päinsä ulkona sateella. Mittasillojen kalibrointeihin on varattava yhdestä kahteen työpäivää. Niistä suuritöisin on Y-voimaa mittaavan sillan kalibrointi. Se vaatii neljä erillistä toimenpidettä, joihin liittyy kiskon paikallinen kuormittaminen erilaisilla voiman sisäänvientijärjestelyillä. Tässä yhteydessä joudutaan kiskoon kiinnittämään joksikin aikaa teräksinen, hydraulitunkilla ja voima-anturilla varustettu kuormituskehä. Kyseinen kalibrointitoimenpide vaatii kerrallaan ajallisesti pisimmän yhtäjaksoisen työrupeaman eli noin tunnin.

### 4.4.3 Muut anturiasennukset

Siirtymäantureita varten pölkkyyn liimataan sopivat metalliset kiinnikkeet. Ne sijoitetaan siten, että itse kiinnikkeet sekä niihin asennettavat anturit pysyvät liikkuvan kaluston sallimalla alueella. Kiinnikkeiden liimaamiseen käytetään nopeasti kovettuvaa epoksiliimaa, jolloin pituudeltaan 15-30 minuutin tauot junaliikenteessä olisivat riittävän pitkät työn etenemisen kannalta. Pölkyn pystysiirtymiä mittaavien antureiden

kiinnikepalkit hitsataan pystyteräksiin asennustöiden kestäessä. Mikäli tämä ei ole mahdollista paikallisin resurssein, varautuu Lujusopin laboratorio tuomaan mukanaan hitsauslaitteet. Anturit on valmiiksi kalibroitu laboratoriossa, joten asennuspaikalla riittää pelkkä tarkistusluonteinen kalibrointi. Kyseisille asennuksille on varattava kaapelointineen aikaa kolmisen työpäivää.

#### 4.4.4 Muut asennustyöt

Mittauskoppiin sijoitettavan laitteiston asennukset ja kytkennät, koko järjestelmän toiminnan testaaminen sekä mittauksen jälkeinen instrumentoinnin purkutyö vievät aikaa yhdestä kahteen päivää.

### 4.5 Eri osapuolten tehtävät ja vastuut

#### RHK / VR-Rata Oy:

- Hankkia varmistus sille, miten kiskojen jatkoshitsaukset sijoittuvat instrumentointikohteen läheisyydessä
- Hankkia varmistus sille, miten kulunvalvontalaitteistoihin liittyvät varusteet ja laitteet sijoittuvat instrumentointikohteen läheisyydessä
- Toimittaa tiedot liikenteen ajoittumisesta kaavailtuna mittausajankohtana kesäkuun 1999 lopussa – heinäkuun 1999 alussa

#### VR-Rata Oy:

- Ratapenkereen muotoileminen tarkasti normaalipoikkileikkauksen Jk-2-PBxxx mukaiseen muotoon 20 m matkalta instrumentointikohteen ympäristöstä.  
**HUOM! Tässä vaiheessa on ehdottomasti varottava ratapenkereeseen mahdollisesti jo asennettujen mittausinstrumenttien ja erityisesti niiltä tulevien kaapeleiden vaurioittamista!**
- Asennusvaiheen 1 yhteydessä:
  - Asennuskohteessa mahdollisesti sijaitsevien kaapeleiden sijainnin selvittäminen ennakolta ja siirto tarvittaessa
  - Ratapenkereen aukikaivu kuvan 4 mukaisen periaatepiirustuksen mukaisesti
  - Ratapenkereen täyttö ja tiivistäminen junaliikenteen turvallisen sujumisen edellyttämällä tavalla
  - Max raekooltaan 16 mm olevan asennushiekan (noin 10 m<sup>3</sup>) hankinta ja toimittaminen asennuskohteeseen
  - Mahdollisten ylisuurten (# > 150 mm) kivien ja lohcareiden poistossa tarvittavan seulontakaluston toimittaminen asennuspaikalle (Vaihto-

ehtoisesti kivetöntä täyttöhiekkaa varataan riittävästi, jotta alkuperäistä mahdollisesti kivistä materiaalia ei tarvitse käyttää lainkaan.)

- Turvajärjestelyt asennusvaiheen aikana
- Asennusvaiheen 2 yhteydessä:
  - Noin kahden tunnin pituisen työkatkon järjestäminen asennusvaiheen 2 ajaksi siten, että seulontakone voidaan pysäyttää täsmälleen instrumenttien asennuskohdan päälle.
  - Turvajärjestelyt asennusvaiheen aikana
- Asennusvaiheen 3 yhteydessä:
  - Anturikiinnikkeissä tarvittavien pystyterästen asentaminen kuvan 1 mukaisesti ennen asennusvaiheen 3 alkua ja kuvan 1 mukaisten painokairausten tekeminen/teettäminen samassa yhteydessä.
  - Turvajärjestelyt asennusvaiheen aikana
- Mittausten yhteydessä:
  - Lukittavan mittauskopin hankkiminen asennettujen instrumentointien välittömään läheisyyteen.
  - Sähkönsyötön järjestäminen mittaus- ja rekisteröintilaitteille

#### **TTKK:**

- Maanpaine- ja venymäanturien asennus ja sijainnin mittaus
- Asennustyön aikana tehtävien tiiviys- ja pudotuspainomittausten suorittaminen sekä asennusvaiheisiin 1 ja 2 liittyvien maarakennustöiden valvonta
- Ratapenkereestä tehtävät mittaukset

#### **TKK/Lujuusoppi:**

- Raiteen instrumentoinnin asennustyöt
- Raiteesta tehtävät mittaukset

#### **TKK/Tietekniikka:**

- Turvajärjestelyjen koordinointi TKK:n ja TTKK:n henkilökuntien osalta



## **5. MITTAUKSET**

### **5.1 Mittausten ajankohta ja kesto**

Mittausten suunniteltu ajankohta on kesällä 1999, ja niiden ajateltu kesto on 1,5 - 2 vrk, jona aikana pitäisi saada rataosalle edustava näyte eri tyyppisiä junia.

### **5.2 Eri osapuolten tehtävät ja vastuut**

Sekä TTKK/Geo että TKK/Luj vastaavat ensisijaisesti omien antureittensa mittaustiedon keräämisestä PC-ohjatuilla järjestelmillä. TKK/Luj tuo paikalle junan nopeuden mittaamiseen soveltuvan tutkan sekä kaksi 16-kanavaista DAT-nauhuria, joilla saadaan talteen 32 tärkeimmäksi arvioitua anturisignaalia. Yöaikaankin paikalla on vähintään kaksi operaattoria, joiden vuoroista sovitaan erikseen.

### **5.3 Turvajärjestelyt**

Mittausten aikana ei radalla tarvitse oleskella, vaan operaattorit oleilevat pääasiassa mittauskopissa. Poikkeustilanteissa (esim. häiriö anturin toiminnassa) saattaa tulla tarvetta poiketa radalle, jolloin on syytä vähintäänkin kahden henkilön olla paikalla.

## 6. KUSTANNUKSET

### 6.1 TKK Lujuusopin laboratorio

#### 6.1.1 Instrumentoinnin kustannukset

Arvio on tehty olettaen, että instrumentointi noudattelee laajuudeltaan edellä esitettyä suunnitelmaa. Laboratoriossa ennakoon tehtävän valmistelutyön lisäksi on varauduttu siihen, että radalla kuluu aikaa kaksi työviikkoa.

1. Ennakkovalmistelut laboratoriossa	17 000,-
- anturikiinnikkeet	
- siirtymäanturien kalibrointi	
- pystyvoiman mittauksen instrumentoinnin ja kalibroinnin testaus	
2. Toimenpiteet radalla	65 000,-
- venymäliuska-asennukset	
- siirtymä- ja venymäanturien asennukset	
- kaapelointi	
- voimien kalibrointi	
- laitteiston toiminnan testaus	
- instrumentoinnin purku	
3. Kuljetus-, matka- ja majoituskulut	20 000,-

#### 6.1.2 Mittauksen kustannukset

Arvio on tehty olettaen, että TKK/Luj osallistuu itse mittaukseen yhden henkilön voimin, ja että mittausmatkaan sisältyy kaksi yöpymistä.

1. Työkustannukset	5 000,-
2. Laitekustannukset	5 000,-
3. Kuljetus-, matka- ja majoituskulut	2 500,-

=====

TKK/Lujuusopin osuus instrumentoinnista ja mittauksista yhteensä  
114.500,-

## 6.2 TTKK/Geotekniikan laboratorio

### 6.2.1 Instrumentoinnin kustannukset

Edellä esitetyssä laajuudessa toteutettavan ratapenkereen instrumentoinnin verottomat kustannukset ovat alla esitetyn erittelyn mukaiset:

#### Antureiden hankinta-/valmistuskustannukset:

• Maanpaineen mittausanturit 4 kpl, á 3.500,- mk/kpl	14 000,-
• Venymäanturit 14 kpl, á 2.500,- mk/kpl	35 000,-
• Lämpötila-anturit 3 kpl, á 1.500,- mk/kpl	4 500,-
• Volymetrinen vesipitoisuuden mittausanturit (Percometer) 2 kpl, á 5.000,- mk/kpl	10 000,-

#### Muut ennakkovalmistelut:

• Venymäantureiden asennustyökalujen valmistus	5 000,-
• Antureiden kalibroinnit sekä asentamiseen liittyvät ennakkokokeet	10 000,-

#### Asennustyöt radalla:

• Työkustannukset	12 000,-
• Matka- ja majoituskustannukset	5 000,-

### 6.2.2 Mittauksen kustannukset

Arvio on tehty olettaen, että TTKK/Geo osallistuu mittaukseen alkuvaiheessa kahden henkilön (mittaaja + sähkömies) ja loppuvaiheessa yhden henkilön voimin.

• Työkustannukset	7 500,-
• Laitekustannukset	5 000,-
• Matka- ja majoituskustannukset	2 500,-

=====

**TTKK/Geotekniikan osuus instrumentoinnista ja mittauksista yhteensä  
110.500,-**



## 7. INSTRUMENTOINTIKOHTTEEN MALLINNUS

### 7.1 Yleistä

Edellä esitetyllä tavalla instrumentoidun ratarakenteen mekaanisen toiminnan mallintaminen on oleellinen osa instrumentointikohteesta saatavien mittaustulosten hyödyntämistä. Mallinnus on tällöin luonnollisesti mahdollista tehdä monella eri tarkkuustasolla, jolloin myös mallinnustyön ja mallinnuksesta aiheutuvien kustannusten suuruusluokka vaihtelee varsin laajoissa rajoissa. Tässä yhteydessä esitettävä ehdotus käsittää instrumentointikohteesta saatavien mittaustulosten mallintamisen suhteellisen yksinkertaisia tarkasteluja käyttäen. Näiden tarkastelujen perusteella on kuitenkin mahdollista arvioida instrumentointikohteesta saatujen mittaustulosten luotettavuutta, saada yleiskuva instrumentointikohteen ratapenkereen ja sen eri rakenneosien mekaanisesta toiminnasta ja toiminnan mallinnukseen käytettävien menettelyjen soveltamismahdollisuuksista muihin vastaaviin mallinnustehtäviin sekä luoda pohja mahdollisesti myöhemmin tehtävien instrumentointikohteen yksityiskohtaisempien analysointien suunnittelulle.

### 7.2 Raiteen mallinnus

Mittausaineistosta etsitään suureiden riippuvuuksia pyöräkuormista ja junan nopeudesta. Samalla selvitetään, miten mitatut suureet suhtautuvat kirjallisuudessa esiintyviin kaavoihin ja niiden avulla saataviin parametreihin. Erityisesti pystysuoran pyöräkuorman ja pölkyn painuman välinen yhteys on keskeinen selvitettävä samoin kuin kiskon liikkeet pölkkyyn nähden.

Mallinnus on tässä vaiheessa ajateltu melko yksinkertaiseksi, joten työtunteja on tarkoitus käyttää vain 150. Kustannuksia kertyy työstä 30 000 mk ja yleiskuluja 3 500 mk., joten **raiteen mallinnuksen kustannusarvio on 33 500 mk.**

### 7.3 Ratapenkereen mallinnus

#### 7.3.1 Ratapenkereen mallinnukseen liittyvät osatehtävät

Ratapenkereen mekaanisen toiminnan mallinnus ehdotetaan tässä vaiheessa tehtäväksi seuraavista osatehtävistä koostuvana:

- Mittaustulosten esikäsittely ja edustavien kuormituspulssien valinta
- Täydentävät laboratoriokokeet
- Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva mallinnus
- Mallinnus elementtimenetelmällä

### 7.3.2 Mittaustulosten esikäsittely

Koska instrumentointikohteessa tehtävien mittausten yhteydessä kertyvä datamäärä on väistämättä huomattavan suuri, ei kaikkien kuormituspulssien mallintaminen ole käytännössä mahdollista eikä edes tarkoituksenmukaistakaan. Niinpä mallinnustyön ensimmäisenä vaiheena tulee olla mittaustulosten alustava esikäsittely ja tarkempaan tarkasteluun otettavien, erilaisia akselipainoarvoja edustavien kuormituspulssien valinta. Käytännössä tämä työvaihe on tehtävä tiiviissä yhteistyössä raiteen mallintamista käsittelevän tutkimusosuuden kanssa.

### 7.3.3 Täydentävät laboratoriokokeet

Jotta instrumentointikohteen ratapenkereen toiminnan mallintaminen voidaan tehdä mahdollisimman tarkasti kohteen todellisia olosuhteita vastaavia jännitystasosta riippuvia materiaaliparametrejä käyttäen, on ne käytännössä välttämätöntä määrittää laboratorio-olosuhteissa suuruudeltaan tarkoin säädeltävissä olevia kuormituksia ja siirtymiä käyttäen. Tähän tarkoitukseen soveltuva koemenettely on testattavien materiaalien karkearakeisuus huomioon ottaen mittakaavaltaan riittävän suurikokoinen dynaaminen kolmiaksiaalikoee. Mittausinstrumenttien asentamisen yhteydessä instrumentointikohteesta onkin syytä ottaa riittävä määrä näytemateriaalia kolmiaksiaalikoekien tekemistä varten.

### 7.3.4 Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva mallinnus

Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuvassa mallinnuksessa ratapenkereen toiminta palautetaan lineaarisesti kimmoisen puoliavaruuden käyttäytymiseksi nk. Odemarkin laskentamenettelyä käyttäen. Mallinnuksen ensi sijaisena tavoitteena on pystyä arvioimaan raiteen alla olevan rakenteen pystysuuntaista jäykkyyttä ('track modulus') kun ratapenkereen kerrosrakenne ja kerroksissa olevat materiaalit tunnetaan. Alustava mallinnus voidaan tällöin tehdä kirjallisuuden perusteella arvioitavien materiaaliparametrien perusteella. Tarkempaan ja luotettavampaan tulokseen pääseminen edellyttää kuitenkin mallinnuksen tekemistä kyseessä olevan kohteen materiaalille nimenomaisesti määritettyjä materiaaliparametrejä käyttäen.

Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuvan mallinnusvaiheen keskeisimpänä tavoitteena on siis varmistua kyseisen mallinnustavan toimivuudesta ja tarkkuudesta instrumentointikohteen tapauksessa ja edelleen tehdä arvio sen soveltamismahdollisuuksista muiden ratapenkereiden mekaanisen toiminnan analysointiin.

Yksityiskohtaisempi kuvaus lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuvista mallinnus-tarkasteluista ja niihin liittyvistä erityiskysymyksistä esitetään akselipainoprojektiin liittyvän alusrakennetta koskevan kirjallisuustutkimuksen yhteydessä.



### 7.3.5 Mallinnus elementtimenetelmällä

Koska edellisessä kohdassa mainitun mallinnustavan yhteydessä rakennekerrokset joudutaan muun muassa idealisoimaan vaakasuunnassa äärettömän laajoiksi, ei sen perusteella ole mahdollista tehdä esimerkiksi arvioita pengerleveyden vaikutuksesta ratapenkereen mekaaniseen toimintaan. Käytännössä leveysvaikutuksen tarkastelu edellyttääkin tarkempien laskentamenetelmien – lähinnä elementtimenetelmän – käyttöä.

Tässä yhteydessä ratapenkereen toiminnan mallintamista elementtimenetelmällä ehdotetaan tehtäväksi varsin yksikertaista kaksiulotteista rakennemallia ja mikrotietokonepohjaista mallinnusohjelmistoa (esim. hollantilainen PLAXIS) käyttäen. Tavoitteena on tällöin ennen kaikkea saada tarkempi käsitys penkereen leveysvaikutuksen mallintamiseen liittyvästä problematiikasta ylipäättään ja mahdollistaa ongelman tarkempaan käsittelyyn tähtäävän tutkimusehdotuksen laatiminen. Samalla voidaan tehdä arvio instrumentointikohteesta saatujen mittaustulosten käyttökelpoisuudesta tätä tarkoitusta silmällä pitäen.

### 7.3.6 Ratapenkereen mallinnuksen aikataulu ja kustannukset

Edellä ehdotettuun mallinnustyöhön kuluvaiksi teholliseksi työajaksi voidaan arvioida noin 12 viikkoa, mikä vastaa noin 3 kk tehollista yhtäjaksoista työtä. Vaikka rakennemallien alustava luonti onkin mahdollista aloittaa jo ennen varsinaisten instrumentointikohteesta tehtävien mittausten käynnistymistä, voidaan valtaosa työstä tehdä vasta kun kaikki mittaukset instrumentointikohteesta on tehty. Koska mallinnus lisäksi tulisi etenemään jossain määrin vaihteittaisena, olisi se tässä ehdotetun laajuisena valmis vuoden 1999 loppuun mennessä.

Koska ratapenkereen mallinnuksessa on tarkoitus käyttää pääasiassa TTKK:n geotekniikan laboratorion käytössä jo olevia ohjelmistoja, muodostuvat mallinnuksen kustannukset pääasiassa mallinnustyöstä vastaavien henkilöiden palkkakustannuksista. Tämän lisäksi jonkin verran kustannuksia muodostuu dynaamisten kolmiaksiaalikokeiden tekemisestä sekä matka- ja monistuskustannuksista. Kokonaisuudessaan tämän ehdotuksen mukaisessa laajuudessa toteutettavan mallinnustyöosuuden kustannukset ratapenkereen mekaanisen toiminnan mallintamisen osalta ovat seuraavat:

• mittaustulosten esikäsittely	70 h * 200 mk/h = 14 000 mk
• kerrosrakennemallinnus	260 h * 200 mk/h = 52 000 mk
• elementtimallinnus	100 h * 200 mk/h = 20 000 mk
• dynaamiset kolmiaksiaalikokeet	2 * 3500 mk = 7 000 mk
• matka- ja monistuskustannukset enintään	4 000 mk

---

**Ratapenkereen mallinnuksen kustannukset yhteensä 97 000 mk**

- |        |  |
|--------|--|
| 1/1997 | Railway Industry Structures and Capital Investment Financing                           |
| 2/1997 | Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset   |
| 3/1997 | Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)                                     |
| 4/1997 | Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla                            |
| 5/1997 | Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020   |
| 1/1998 | Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutusselvitys               |
| 2/1998 | Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)                     |
| 3/1998 | Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät   |
| 4/1998 | Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99                        |
| 5/1998 | Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi |
| 6/1998 | Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankkeissa                         |
| 1/1999 | Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot |
| 2/1999 | Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset     |
| 3/1999 | Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot                |

RATAHALLINTOKESKUS  
KAIVOKATU 6, PL 185  
00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Pasi Leimi, puh. (09) 5840 5184, sähköposti: [pasi.leimi@rhk.fi](mailto:pasi.leimi@rhk.fi)  
Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: [sinikka.kiikka@rhk.fi](mailto:sinikka.kiikka@rhk.fi)

ISBN 952-445-020-8  
ISSN 1455-2604